

## 从集群智能角度分析协同驾驶: 综述和展望

郭宇晴<sup>1</sup>, 姚丹亚<sup>1,2</sup>, 张毅<sup>1,2,3</sup>, 裴欣<sup>1,2</sup>, 李力<sup>1,2</sup>, 李志恒<sup>4†</sup>

(1. 清华大学自动化系, 北京 100080; 2. 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 江苏 南京 210096;

3. 清华—伯克利深圳学院, 广东 深圳 518055; 4. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 协同驾驶是集群智能技术的典型应用之一. 和集群机器人相比, 协同驾驶既有集群智能技术的共性问题, 也有特性问题. 对协同驾驶与集群机器人对比研究, 有助于更好理解协同驾驶问题的内在难点, 也有助于推动集群智能技术的发展, 完善复杂系统科学. 本文从集群智能研究的角度出发, 对协同驾驶进行反思综述. 本文首先介绍协同驾驶的研究背景和意义, 然后从集群智能的角度进一步分析协同驾驶和集群机器人的区别, 接着介绍协同驾驶的关键技术, 并着重强调协同规划在协同驾驶中的特殊性与重要性, 最后分析了世界各国协同驾驶发展现状, 并针对现阶段我国协同驾驶发展的难点提出一些建议, 同时对协同驾驶的未来进行展望.

**关键词:** 集群智能; 集群机器人; 协同驾驶; 协同规划

**引用格式:** 郭宇晴, 姚丹亚, 张毅, 等. 从集群智能角度分析协同驾驶: 综述和展望. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 875 – 886

DOI: 10.7641/CTA.2020.00630

## Analysis of cooperative driving from the perspective of swarm intelligence: overview and outlook

GUO Yu-qing<sup>1</sup>, YAO Dan-ya<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi<sup>1,2,3</sup>, PEI Xin<sup>1,2</sup>, LI Li<sup>1,2</sup>, LI Zhi-heng<sup>4†</sup>

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100080, China;

2. Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Nanjing Jiangsu 210096, China;

3. Berkeley Shenzhen Institute (TBSI), Shenzhen Guangdong 518055, China;

4. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen Guangdong 518055, China)

**Abstract:** Cooperative driving is one of the typical applications of swarm intelligence technology. Compared with swarm robots, cooperative driving has both common and characteristic problems of swarm intelligence technology. The comparative study of cooperative driving and swarm robots is helpful to better understand the difficulties of cooperative driving, promote the development of swarm intelligence technology, and improve the complex system science. This paper reviews cooperative driving from the perspective of swarm intelligence. The paper first introduces the background and significance of cooperative driving, and then further analyzes the difference between cooperative driving and swarm robots from the perspective of swarm intelligence. The paper introduces the key technology of cooperative driving and focuses on the particularity and importance of cooperative planning. Finally, the paper analyzes the development status of cooperative driving around the world, and puts forward some suggestions in view of the difficulties encountered in the development of cooperative driving in China. The future of cooperative driving is forecasted.

**Key words:** swarm intelligence; swarm robots; cooperative driving; cooperative planning

**Citation:** GUO Yuqing, YAO Danya, ZHANG Yi, et al. Analysis of cooperative driving from the perspective of swarm intelligence: overview and outlook. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(7): 875 – 886

### 1 引言

随着自动驾驶(autonomous driving)技术和智能网联(vehicle-to-everything, V2X)技术的飞速发展, 协同

驾驶(cooperative driving)受到人们广泛关注<sup>[1-2]</sup>.

协同驾驶一词在不同的中文语境中有着不同的含义. 在涉及人类驾驶员与自动驾驶控制系统共享汽车

收稿日期: 2020-09-21; 录用日期: 2020-12-30.

†通信作者. E-mail: zhli@tsinghua.edu.cn; Tel.: +86 755-26036849.

本文责任编辑: 陈皓勇.

国家重点研发计划项目(2018YFE0102800), 国家自然科学基金项目(61673233, 71671100), 深圳科创委基础学科布局项目(JCYJ2017041217203008)资助.

Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFE0102800), the National Natural Science Foundation of China (61673233, 71671100) and the Science and Technology Innovation Committee of Shenzhen (JCYJ20170412172030008).

的控制权问题上,协同驾驶指代人机协同,或人车共驾<sup>[3-6]</sup>.而在涉及汽车集群车辆之间的协同问题上,协同驾驶指车车协同驾驶<sup>[7-10]</sup>.

本文主要介绍车车之间的协同驾驶,其指采用先进的自动驾驶和智能网联等技术,协调智能网联汽车集群的轨迹与运动控制,使车辆运行的更加顺畅快捷,减少旅行时间、能耗和污染.其中,智能网联汽车是指搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置,并融合现代通信与网络技术,具备复杂环境感知、智能决策、协同控制等功能的新一代汽车<sup>[11]</sup>.协同驾驶可以提供更安全、更节能、更环保、更便捷的出行方式和综合解决方案,是国际公认的未来交通和汽车的重要发展方向和关注焦点<sup>[7,12]</sup>.

在全智能网联汽车环境下,协同驾驶所涉及的控制对象为无人系统智能网联汽车.相较之全智能网联汽车环境下的协同驾驶,混合交通流下的协同驾驶除包括无人系统智能网联汽车外,还包括人类驾驶汽车.因涉及人类驾驶汽车与智能网联汽车之间的交互,人类驾驶汽车的意图、轨迹等不确定性,其研究难度要比全智能网联汽车场景下的协同驾驶大很多.基于此,本文重点介绍全智能网联汽车场景下纯无人系统之间的自主协同.关于混合交通流下的协同驾驶则在未来展望一节中进行介绍.

协同驾驶是指智能网联汽车车与车之间的协同,涉及智能网联汽车集群在车、路、云环境中的协同合作,是集群智能(*swarm intelligence, SI*)技术应用的典型代表,通过车辆之间的自主协同,实现集群的整体目标最优.从集群智能的角度看,协同驾驶所考虑的智能网联汽车集群和机器人集群有着普遍的特点,都是使具备有限自主能力的多个智能体通过相互信息交互,在各种约束条件下共同优化一个全局目标,依靠局部交互作用来实现全局系统行为,从而产生整体效应.二者具有一些共性:1)复杂系统由自由运动的智能体组成;2)智能体能够感知和改变运动状态;3)智能体合作完成特定任务;4)系统均为自组织分布式<sup>[13-14]</sup>.

但是,凭借智能网联和人工智能(*artificial intelligence, AI*)等技术的加持,协同驾驶较集群机器人具有更强的感知与通信能力,并且利用信息规划的能力更强,其所涉及的时空范围更广.这些特点导致一些传统集群机器人技术无法直接应用到协同驾驶上,亟需对协同驾驶的特性和难点进行单独分析.

本文从集群智能研究的角度出发,对协同驾驶进行反思综述,梳理协同驾驶的体系架构,包括其历史演进与研究意义,在关键技术方面与集群机器人的异同,并分析世界各国协同驾驶发展现状,对协同驾驶未来进行展望.

## 2 集群智能与协同驾驶介绍

### 2.1 集群智能

集群智能技术是指智能体集群(或机器人集群)之间通过感知和交互的方式,借助现代控制与决策手段,协同完成个体不易实现的任务<sup>[15]</sup>.集群智能技术在区域测控与搜索、军事侦察与打击、信息通讯、物流运输和交通控制等民用与军事领域得到广泛应用<sup>[16-17]</sup>.

集群智能起源于自然界的智能体集群(蚁群、鸟群)的群体行为.这些群体中的个体简单、低智,群体交互规则也简单明了,产生的智能是由于种群数量量变引起质变造成的(涌现现象),使得群体表现出了智能行为(如觅食路径最小、合作出复杂建筑)等<sup>[14]</sup>.

在机器人领域,研究人员从自然界的集群智能中获得灵感,通过设计一定规则,创建具有一定智能的集群机器人(*swarm robotics*).集群机器人指通过自组织协同控制方式,使多机器人高效完成单机器人无法完成的复杂任务的机器人集群.这些集群机器人系统具备自组织、分布式和涌现性3个典型特征<sup>[14,16]</sup>.自组织是指依靠局部交互作用来实现全局系统行为.分布式是指集群机器人系统中没有集中控制,组成的机器人个体不知晓全局信息.分布式使集群机器人系统具有较强的鲁棒性,不会由于某一个或几个个体出现故障而影响集体行为.涌现性是指个体简单的局部行为能产生复杂的全局现象,涌现出一定智能.Reynolds等<sup>[18]</sup>通过个体遵循的3个简单规则:碰撞避免、速度匹配和向群体中心运动,提出了模拟鸟群协同运动的理论模型.Vicsek等<sup>[19]</sup>受铁磁相变的启发,以简单对齐规则建立了集群运动的最小模型,实现了自驱动粒子的一致性运动.Michael等<sup>[20]</sup>通过边界跟随、梯度信息和定位3个简单规则设计,实现了1024个机器人的多种结构图样生成.

随着集群智能的不断研究,集群机器人在覆盖控制、群体控制、监控、编队、交通、运输等领域得到广泛的应用<sup>[15,17,21]</sup>.表1根据定义、感知能力、通讯能力、动力学特征和控制方法对无人机(*unmanned aerial vehicle, UAV*)群、无人艇(*unmanned surface vehicle, USV*)集群、智能货运小车(*automated guided vehicle, AGV*)集群等常见集群机器人进行介绍.这些集群机器人具有一些共性:均是通过自组织协同控制方式,使多机器人高效完成单机器人无法完成的复杂任务;每个个体都需具备一定的感知和通信能力,以能感知周围环境并与其他个体进行信息交互;此外,当根据任务需求规划出机器人轨迹时,都需要一定的控制方法控制机器人使之能在环境干扰下跟踪所规划轨迹.但是由于不同集群机器人的关键任务、所处环境、动力学特征不同,导致在感知、通信能力及控制方法上又有所不同,如表1所示.

表1 常见集群机器人特性介绍  
Table 1 Introduction to common swarm robots

集群名称	定义	感知能力	通讯能力	动力学特征	控制方法
无人机(UAV)群	指多个无人机借助现代通信协同完成区域测控与搜索、军事侦察与打击、物流运输等关键任务	常用视觉感知, 视野小, 受限于无人机机体计算资源, 目标检测与追踪能力有限; 感知主要难点在于遮挡识别及机体快速运动下的图像稳定问题	常用2.4 G等无线通信, 延时小于10 ms, 通讯覆盖范围小, 由于采用自组织通信网络, 网络稳定性较差	6自由度、飞行运动约束强、速率大、非线性、易受风影响; 可进行升降、滚转、俯仰、偏航等操作	常用滑模控制、鲁棒控制、自适应控制、模型预测控制等对轨迹进行跟踪及编队构型控制
卫星集群	指多颗卫星借助于星间通信完成多星成像、气象监控、深空探测等关键任务	常用视觉感知, 视野大, 具备一定目标识别与追踪能力; 感知主要难点在于机体快速运动下的图像稳定问题	采用卫星通信链路, 数据传输量大, 通讯覆盖范围大, 通信距离远, 但传输时延大	6自由度、飞行运动约束强、速率大、非线性, 卫星姿态稳定和卫星姿态控制较难	常用滑模变结构、模糊自适应、鲁棒控制、模型预测控制等对卫星姿态进行控制
无人艇(USV)集群	指多无人艇通过无线通信协同完成海图绘制、资源勘探与开采、领海监视、海上救援等关键任务	常用视觉、激光感知, 视野大, 具备一定目标识别与追踪能力; 感知主要难点在于海上多雾环境下的目标识别	采用UHF/VHF无线电通讯方式、GSM/3G、海事卫星通信几种通信方式, 延时小, 覆盖范围大	6自由度, 易受风、浪、流等干扰, 具有很强的非线性、随机性和大惯性	常用李雅普诺夫直接法、滑模控制、模糊自适应、鲁棒控制等对无人艇航速与航向进行控制
智能货运小车(AGV)集群	指多智能货运小车利用现代通信协同完成运输移栽等关键任务	常用视觉、激光感知, 视野小, 具备一定目标感知和三维地图重建能力	常用WLAN、蓝牙、Zigbee等通信方式, 通讯覆盖范围小, 传输速率小	4自由度、速度慢、运行平稳	常用PID及各种改进PID控制等控制小车速度与方向

## 2.2 协同驾驶

协同驾驶作为集群智能的典型应用之一, 和集群机器人类似, 其将智能网联汽车视为机器人, 通过自组织协同控制多机器人, 使之能优化一个全局目标. 在当前城市道路日益复杂和拥挤的情况下, 相对于交通拥堵车辆诱导、交通拥堵收费以及交通信号灯控制等交通控制策略而言, 发挥协同驾驶对交通出行影响的正面作用, 提高交通安全和效率, 被认为是解决交通问题的根本所在<sup>[22-23]</sup>.

协同驾驶的概念最早是由日本汽车交通与驾驶电子技术协会于20世纪90年代初提出用于车队的编队控制(platooning control)<sup>[22, 24]</sup>. 利用通信和传感技术使车辆在行进过程中形成一系列紧密间隔的车辆串, 以提升道路利用率. 在此之后, 协同驾驶的可行性和优势被进一步讨论, 利用合理的车间通信技术来连接车辆, 使每辆车都能更加安全和高效地进行并换道等操作, 进而提升交通控制性能, 如美国的PATH项

目<sup>[25]</sup>、欧盟的Chauffeur项目<sup>[26]</sup>、日本的Demo 2000协同驾驶系统<sup>[27]</sup>.

近年来, 智能网联和云计算等技术的发展为深入研究协同驾驶提供了可行的技术支撑及研究手段. 智能网联的飞速发展, 尤其5G的到来, 使车车、车路、车云实时通信成为可能, 如图1所示. 云计算的出现给大规模协同实时计算提供了有力的保障. 这些技术使交通参与者、运载工具和道路基础设施的信息获取与交互手段、内容和范围产生了重大变化, 可促进交通的全程协同规划和全面协同控制, 使传统的交通控制被更为精细的基于每辆车实时动态信息的自组织协同驾驶所替代.

借助智能网联、人工智能和大数据分析等, 协同驾驶有助于实现全景交通信息环境下的智能交通管理和服务的集成与协同, 使交通更安全, 出行更畅通, 是未来交通规划及交通协同管控的重要方向, 有着广阔的应用前景.

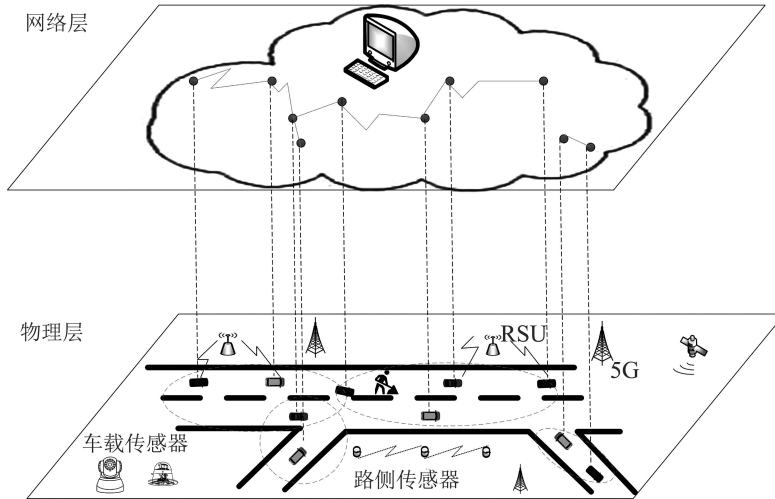


图1 协同驾驶示意图

Fig. 1 Diagram for cooperative driving technology

### 2.3 协同驾驶与集群智能的异同

协同驾驶和集群机器人类似,均是通过自组织协同方式,使个体通过协作方式完成共同目标.其研究和无人机群、卫星集群、智能货运小车集群等集群机器人技术的研究类似,均涉及感知、通信、规划和控制.但是协同驾驶借助于智能网联、人工智能和大数据等技术,其将智能网联汽车作为所考虑的智能体,具有更强的感知与通信能力,并且利用信息规划的能力更强.其中,智能网联拓宽了协同驾驶信息获取的内容和范围.较无人机的局部通信,车联网可实现全网的信息交互,为协同驾驶提供更多的信息来源.而人工智能、大数据和云计算的发展则提升了协同驾驶利用信息规划的能力,较无人机的编队控制等,协同驾驶可实现提前规划和控制路面上行驶的每一辆车从出发地到目的地的整条轨迹.这些特性为协同驾驶研究提供了更多的技术保障.本节首要介绍协同驾驶与集群智能在感知和通信方面的异同,关于规划和控制的异同则在第2.3.1节和第2.3.2节中详细介绍.

在感知方面,如无人机群和无人船集群的搜索救援工作中,其感知目标基本已知,所要感知的对象种类较少.其通过对感知到的物体进行特征提取和匹配,就可完成目标识别的要求<sup>[28]</sup>.但是,在协同驾驶中,交通参与者(行人、电动车、电动滑板车和路面突然出现的各种动物等)具有复杂性和多样性,简单的特征提取和匹配并不能完成交通参与者识别的任务,需要大量多样化和全面的数据来驱动背后的算法模型.这一特性导致集群机器人中的感知研究无法完全适用于协同驾驶中.

在通信方面,协同驾驶由于涉及实时的全时空交通信息上传和计算中心决策规划策略等的下发,对通信的时延有着更严苛的要求,并要求任何车辆能在任

何时间任何地点互联.集群机器人中常用的2.4G通信,其由于普及较早,使用较多,所受干扰较多,传输速率较小,无法保证车辆的实时互联<sup>[29]</sup>.而协同驾驶所采用的5G时延在1 ms左右,峰值速率可达到Gbit/s的标准,可满足协同驾驶的实时通信要求,是协同驾驶信息交互的主要研究媒介<sup>[30-31]</sup>.

#### 2.3.1 轨迹规划

集群智能与协同驾驶中的轨迹规划主要为了完成任务或者实现某种编队队形,为每个机器人寻找从起始点到终点的时空轨迹.

在轨迹规划方面,对于较少的机器人集群(数量为3-5),集群机器人常将所有机器人的轨迹点坐标视为决策变量,对所有机器人的轨迹进行集中式进行规划<sup>[32]</sup>.对于较多的机器人集群(数量为5-20),则常采用分布式轨迹规划,按照一定顺序对机器人分别进行轨迹规划,后续机器人在进行轨迹规划时只需与上一个机器人满足避撞即可<sup>[33-34]</sup>.较集群机器人的规模(数量常为3-20),协同驾驶涉及路网级别的车辆协同规划,其规模更大,采用集群机器人中集中式的轨迹规划方法根本无法满足协同驾驶实时规划的要求.但若采用分布式轨迹规划,集群机器人中的简单顺序分配根本无法保证交通效率.这些导致了现阶段的集群机器人中的轨迹规划研究无法完全适用于协同驾驶.

而地面车辆的协同驾驶一些特别之处:强烈道路几何约束,有限的动态性能,多种相对简明的控制目标,可使协同驾驶从另一个角度简化协同轨迹规划问题.在协同驾驶中车辆之间存在着很多的轨迹冲突点,如路口、匝道汇流等的冲突区.为满足车辆间的避撞要求,需对车辆到达冲突区的先后顺序进行规划.这些冲突区在地面路网分布较广,且位置固定.通过确定冲突区的顺序,再反推所需要的轨迹,就可将整个

协同轨迹规划问题大大简化, 迎刃而解<sup>[35-37]</sup>。

在如无人机群和卫星集群的集群机器人中, 虽也有轨迹冲突点, 但冲突点较少, 且位置不固定. 轨迹规划只要满足避撞即可, 当两辆机器人在冲突点即将发生轨迹冲突时, 其中一个机器人可通过绕行的方式, 避开碰撞, 因此其无需太关注冲突点的先后顺序. 而这些集群机器人受天气等环境因素及动态因素影响显著, 规划出的轨迹需能在恶劣天气下被机器人跟踪. 因此这类轨迹规划的研究重点并不会放在冲突区的顺序分配上, 而是放在轨迹的鲁棒性及轨迹跟踪控制上. 控制是指控制智能体的速度与行驶方向, 使其跟踪规划的速度曲线与路径. 对于无人机、无人船等, 如何在恶劣天气下控制机器人, 保证整体性能的稳定性和鲁棒性是其研究热点<sup>[38]</sup>。

智能货运小车与协同驾驶类似, 其冲突点位置固定. 但是, 智能货运小车的规模较小, 冲突区到达先后顺序分配策略的最优性与否并不会对整体性能产生太大的影响, 因此在货运小车中常采用先入先出策略 (first-in-first-out, FIFO) 分配到达冲突点顺序, 然后根据到达时间反推轨迹规划. 但是协同驾驶涉及路网级别的轨迹规划, 其规模更大, 当冲突区车辆顺序分配不当时, 不仅会对冲突区造成严重影响, 还会对整个路网交通产生严重影响, 造成交通拥堵. 而采用智能货运小车中常用的先入先出的策略, 在协同驾驶中常常无法有效提高交通效率, 因此亟需针对协同驾驶的特点进行协同规划, 规划车辆到达冲突区的次序, 以提升交通安全和效率<sup>[37]</sup>. 但是协同驾驶由于涉及的车辆数较多、规模较大, 实时求解到达冲突区次序分配较难. 如何在有限时间内获得较好的协同规划策略, 以满足协同驾驶的实时性要求是当前协同驾驶研究的主要难点<sup>[36-37]</sup>。

### 2.3.2 编队控制

集群智能与协同驾驶中的协同控制主要为了实现特定的群体行为, 编队控制作为协同控制的重要组成部分, 在集群智能与协同驾驶中得到了人们的广泛关注.

编队控制是指通过将具有自主控制能力的智能体按照指定的队形和结构进行排列, 并设计编队控制器使得所有智能体在运动过程中不仅能够保持队形的稳定, 协同完成各项任务, 还可以进行队形的实时调整. 编队控制在协同侦察、飞行表演、应急救援以及协同驾驶中的自适应巡航控制中都得到了广泛的应用<sup>[38-41]</sup>。

在编队队形生成上, 集群机器人如无人机群等因涉及军事任务或表演任务等, 其生成队形常复杂、多变. 相较集群机器人编队控制的主要重点在空间和平面的三维和二维编队上, 协同驾驶编队控制的主要重

点则在一维车队的自适应巡航控制上. 相较集群机器人, 协同驾驶中的编队控制因受有限道路几何形状的限制和车车前后位置关系的约束, 其队形相对简单、单一.

无论是集群机器人的二维、三维编队, 还是协同驾驶的一维编队, 如何在复杂环境下保持编队队形的稳定, 保证扰动不会沿队列放大, 是集群机器人和协同驾驶共同的研究重点. 研究者讨论了多种控制方法, 如模型预测控制、自适应控制、鲁棒控制在编队控制稳定性上的作用, 参见文献<sup>[42]</sup>的综述.

## 3 协同驾驶技术介绍

为实现整体交通安全和效率的提升, 协同驾驶需获得全时空动态交通信息, 即微观车辆、中观集群和行车环境、宏观交通等在当前和过去时刻的信息, 分析车辆的微观特性、中观行车环境特性、宏观交通运行特性, 对动态障碍物未来态势、车辆集群运动态势及交通运动态势进行预测推演, 进而对车辆集群进行群体协同规划与控制, 实现整体交通安全和效率的提升<sup>[1,10]</sup>。

为实现这一目标, 协同驾驶需涉及汽车、信息通信、云计算等诸多领域, 其技术架构示意图如图2所示. 其中, 全时空动态交通信息的获取是协同驾驶控制与决策的基础, 特性分析和态势预测推演是协同驾驶的支撑, 车辆集群的协同决策与规划是协同驾驶执行任务的最基本形式. 而这些环节需要可靠实时的通信来保障, 信息交互是协同驾驶的重要保障.

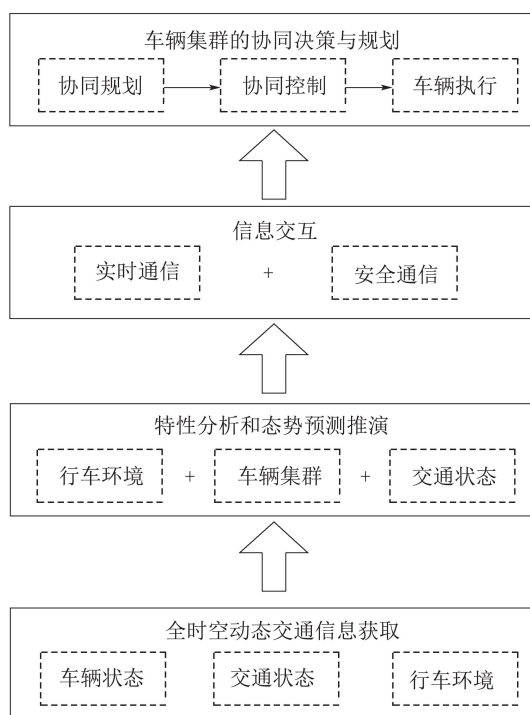


图2 协同驾驶技术架构示意图

Fig. 2 Architecture diagram for cooperative driving



如上文第2.3.1节所述,实时有效的求解协同规划策略是当前协同驾驶的难点,因此本文在第4部分对协同规划进行重点介绍。本部分则主要对其他关键技术进行介绍。

考虑到局部关键冲突区域里车辆的协同驾驶是影响整个交通路网效率的关键所在,目前协同驾驶研究主要集中在如匝道合流区、十字路口等的局部冲突区域的协同驾驶研究上。由于受强烈的道路几何约束和车车前后位置关系的约束,局部冲突区域所涉及的车辆数目较少,其所需要的计算资源较少,特性分析、动态预测、协同规划及协同控制的运算和分析既可在车辆本地进行,也可在云端进行。其具体实现方案将在下文进行详细介绍。但是当协同驾驶从局部冲突区扩展到大规模交通路网时,因其控制车辆数的急剧增加,上述的两种方案不再适用。需本地计算和云端运算协作,共同完成特性分析、动态预测、协同规划及协同控制。如何合理的将上述任务分工给本地计算和云端运算,保证协同驾驶的实时性、安全性、高效性,亟待研究者进一步的探索。

目前局部冲突区的协同驾驶既可通过车辆自组织网络,也可通过靠近冲突区域中心的集中式云端来实现。

在车辆本地运算分析中,智能网联汽车广播他们的状态、意图信息及感知和处理过的周围环境信息,所有靠近冲突区域的智能网联汽车被自动组织成一个网络。接下来,其中一个车辆被动态地选择为领导者,为智能网联汽车规划轨迹,并将规划控制结果发送给其他车辆。在车辆本地运算分析中,车载服务器需至少配备四核高性能处理器,以保证车辆运算的实时性<sup>[43-44]</sup>。

在云端运算分析中,所有在控制区内的智能网联汽车都直接与云端沟通并发送他们的状态信息。然后,云端通过强大的计算设备计算出协同规划及控制策略,并将其发送给控制区内的所有智能网联汽车。为保证车辆的实时安全高效行驶,考虑车辆在最大速度下遇到紧急情况下刹车的操作时间,智能网联汽车所能容忍云端的最大计算和传输时延为100 ms<sup>[9,45]</sup>。

### 3.1 全时空动态交通信息获取

全时空动态交通信息获取是协同驾驶控制与决策的基础,所要感知信息主要为车辆状态、交通状态和行车环境。车辆状态感知是指利用惯性测量单元、GPS等获得自车的位置、速度等车辆信息,为协同驾驶提供个体车辆信息。交通状态感知指利用线圈、超声波、微波等获得交通相关信息,如信号灯、交通流速度等信息,为协同驾驶提供整体状态信息。相较车辆状态感知和交通状态感知,目前全时空动态交通信息获取的主要难点在于行车环境感知。

行车环境感知是指利用摄像头、毫米波雷达、激光雷达、超声波等主要车载传感器通过提取路况信

息、检测障碍物,为智能网联汽车提供决策依据。利用机器视觉的目标识别技术和利用雷达的障碍物检测与目标追踪技术在集群机器人中均有一定的发展,如无人机群利用双目相机感知建筑物,并在建筑物间穿梭<sup>[46]</sup>。在集群机器人中,其所处环境相对固定单一,所处环境中的障碍物也多为静态。但是在协同驾驶中,其所处环境更加复杂,对感知的要求更高。此外交通参与者的复杂性和多样性、行驶环境(天气环境、道路环境)的复杂性、动态障碍物的高速运动特性等都给协同驾驶感知增添了许多难点<sup>[47]</sup>。

深度学习的出现给协同驾驶感知提供了有力的研究手段,研究者通过采用深度学习方法对行车环境中的障碍物进行识别<sup>[47-49]</sup>。此外,高分辨率激光雷达和高精度定位的出现也给协同驾驶提供了更精细化的环境感知<sup>[48,50]</sup>。但目前的感知和定位能力均无法胜任真实道路的全部场景。相较于集群机器人,如何处理不确定性,进行容错协同,保证车辆安全也是协同驾驶的关键问题<sup>[51]</sup>。

智能网联的出现也拓宽了车辆感知的能力和范围,利用通信可将不同车载、路侧采集到的信息进行融合,用以获取丰富的周边环境信息,有效扩大车辆视距,避免感知盲区。并且通信的加入可有效降低感知的难度,具有优良的环境适应能力<sup>[52]</sup>。通过车路通信,车辆可获得交通信号灯信息,避免了因为光照或遮挡,识别不出信号灯的问题。但是路侧、车载等传感器感知数据的多源异构特性给多传感器数据融合技术增添了许多困难。较集群机器人,协同驾驶中传感器的种类(激光、雷达、相机)和来源(路侧、车载)更多,多源异构特性使不同感知数据进行时空同步融合更难<sup>[53-54]</sup>。

### 3.2 特性分析和态势预测推演

在获取全时空动态交通信息后,需要对其进行有效的处理和分析,对感知到的对象进行特性分析,并对其态势进行预测推演。

在微观层面,对于行车环境中的动态障碍物,需根据其过去行为分析其运动特征,对其运动态势进行预测推演,预测障碍物在接下时间区间内的时空轨迹,以保证微观层面上车辆个体能满足避撞要求。

在局部层面,协同驾驶需要对车辆集群的运动特征进行分析,建模其运动态势,并对其控制影响进行分析。

在宏观层面,协同驾驶需要对包括出行者、运载工具和交通环境等在内的多维交通数据进行融合与协同处理,研究包括道路状态、交通运动状态和尾气排放等在内的交通数据融合与协同处理方法。较集群机器人,协同驾驶需从繁杂的交通数据中发现特定规律来更好的指导协同驾驶,如需对人们出行方式等进行分析<sup>[55]</sup>。但是数据量的庞杂给数据分析增加了很多难度。而大数据的关联分析和深度挖掘技术的飞速发展

给上述问题提供了有力的解决方案<sup>[56]</sup>.

但是,相较于集群机器人,协同驾驶特性分析和态势预测推演所涉及的数据量巨大,需要数据的高效存储和检索.由于需实时用整体交通状态指导车辆协同驾驶,对信息处理与方案计算的速度要求也更高.云计算的出现满足了以上这两点要求,使协同驾驶特性分析和态势预测推演可满足实时性的要求<sup>[57]</sup>.

### 3.3 信息交互

协同驾驶需要可靠的通信手段保证实时信息交互.信息交互包括多模通信技术,移动自组织网络技术,多模式通信融合技术等.随着通信技术和智能网联技术的发展,协同驾驶通信技术经历了有线通信、无线通信、移动通信及5G的阶段,协同驾驶的覆盖范围也发生了变化.早期协同驾驶利用有线通信的路侧单元(道路提示牌)进行车辆的可变限速控制.随着移动通信和无线通信的发展以及专用短程通信(dedicated short range communication, DSRC)的出现,车辆可以完成车与车点对点通信.但是这些通信技术在使车与车之间构成一个无缝、联通的网络仍存在挑战,只适合局部范围的协同驾驶<sup>[24]</sup>.

相较于集群机器人,协同驾驶对通信的实时性和信息的完备性要求更高.协同驾驶需要对车辆前方的突发情况进行实时处理,感知获取的信息需及时上传到中心处理器,而中心处理器计算出的车辆控制策略也要及时返回到车辆,以保证车辆安全.这就需要极小的时延和高度可靠的通信来保障.5G的出现为协同驾驶提供了可靠的通信渠道,其毫秒级的端到端超低时延特性可满足协同驾驶的需要.此外,5G的连续广域场景覆盖特性,使车辆在任何地域都能实现无缝的高速通信,并可使车辆高速移动的情况下也能正常以高速率通信,这些特性均满足了协同驾驶可靠通信的要求<sup>[30-31]</sup>.

较常见的集群机器人,协同驾驶中信息安全问题更不容忽视.繁杂的数据既涉及交通参与者的个人信息,也涉及交通管理与车辆控制.不恰当的数据泄露不仅会给系统造成不必要的麻烦,还会导致交通事故的发生,严重损害人身安全<sup>[58]</sup>.因此,在协同驾驶中,信息安全技术也尤为重要.涉及信息安全的认证、编码、容错和防灾技术等协同驾驶中需重点考虑.

### 3.4 车辆集群的协同规划与控制

全时空动态交通下车辆的协同规划与控制是协同驾驶执行任务的最基本形式.其中,协同规划主要负责规划每辆智能网联汽车的时空轨迹.当协同规划确定每辆车的轨迹后,协同控制主要负责控制每辆车跟踪相应轨迹,使其达到期望的速度和行驶状态<sup>[42]</sup>.车辆执行主要指车辆刹车、油门、自动变速器等根据控制指令,执行相应操作.车辆执行由于所涉及的技术较少,在汽车领域已发展成熟,因此在本文就不过多

介绍.由于全时空动态交通下车辆的协同决策与规划的主要难点在协同规划上,因此在第4部分,对协同规划技术进行重点介绍.在本部分,本文主要对协同控制进行介绍.

协同控制技术,除了包括面向驱动/制动的纵向运动控制、面向转向的横向运动控制和基于驱动/制动/转向/悬架的底盘一体化控制外,还包括多车队列协同和车路协同控制等<sup>[41-42]</sup>.当协同规划确定每辆车的轨迹后,协同控制则控制每辆车跟踪相应轨迹,使其达到期望的速度和行驶状态.对于常见集群机器人,其受天气因素影响较大,如风对无人机的影响,海上波浪对无人艇的影响.而相交之,天气因素对协同驾驶的影响较小,传统的控制方法就可达到控制要求,如模型预测控制、自适应控制、鲁棒控制等<sup>[40-42]</sup>.

## 4 协同规划

协同规划是指在满足车辆动力学约束、避撞约束、道路几何约束等约束情况下,按照给定的评价指标(例如整体耗时/耗能等),在有限道路空间,寻找每辆车从起始状态到目标状态的时空运动轨迹<sup>[35-37]</sup>.相较于集群机器人,协同驾驶除了要满足集群机器人中的动力学约束、避撞约束外,还要满足道路几何约束.道路几何约束的施加虽然使协同规划的可行空间受限,缩小了协同驾驶的规划空间,但另一方面也减少了规划解的搜索时间,使问题简化.

本文将一般的协同规划问题表述为优化问题.每辆车的状态表示为 $x_i(k)$ (如车辆中心点的位置,车辆速度等)<sup>[9,59]</sup>.其中: $i = [1, 2, \dots, I]$ 表示第 $i$ 辆车的索引, $k = [1, 2, \dots, K]$ 表示第 $k$ 个时间点.每辆车的控制变量(如车辆加速度)用 $u_i(k)$ 表示.

协同规划的目标是通过确定一系列控制输入 $u_i(0), u_i(1), \dots, u_i(K)$ 在有限的时间范围内 $[0, K]$ ,在满足起始状态、目标状态、系统动力学、碰撞避免约束和其他约束的条件下,最小化某一性能指标 $J$ .可以把这个优化问题表述为

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{k=0}^K J(x_i(k), u_i(k)), \quad (1)$$

满足:

1) 起始状态

$$x_i(0) = x_i^0, \quad i = [1, 2, \dots, I]; \quad (2)$$

2) 目标状态

$$x_i(K) = x_i^K, \quad i = [1, 2, \dots, I]; \quad (3)$$

3) 系统动力学

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(k) &= f(x_i(k), u_i(k)), \\ i &= [1, 2, \dots, I], \quad k = [0, 1, \dots, K]; \end{aligned} \quad (4)$$

4) 控制边界约束

$$\begin{aligned} u_{\min} \leq u_i(k) \leq u_{\max}, \\ i = [1, 2, \dots, I], k = [0, 1, \dots, K]; \end{aligned} \quad (5)$$

5) 状态约束(如对车速、加速度、转向角等的大小限制)

$$\begin{aligned} \omega[x_i(k), u_i(k)] \in \Omega, \\ i = [1, 2, \dots, I], k = [0, 1, \dots, K]; \end{aligned} \quad (6)$$

6) 道路几何约束

$$\begin{aligned} \varphi[x_i(k), u_i(k)] \in \Phi, \\ i = [1, 2, \dots, I], k = [0, 1, \dots, K]; \end{aligned} \quad (7)$$

7) 避撞约束

$$\begin{aligned} \psi[x_i(k), u_i(k)] \in \Psi, \\ i = [1, 2, \dots, I], k = [0, 1, \dots, K], \end{aligned} \quad (8)$$

其中:  $f, \omega, \varphi, \psi$  是确定函数,  $\Omega, \Phi, \Psi$  是集合.

上述问题涉及每一辆车在每一时刻的状态和控制变量求解, 其计算时间随车辆数指数型增长. 当车辆数增多时, 直接求解此优化问题根本无法满足协同驾驶实时性的要求.

考虑协同驾驶的本身特点, 即强烈的道路几何约束、有限的动态性能, 研究者将上述问题进行简化, 将优化问题分解为路权分配和轨迹反推两步. 对于协同驾驶的协同规划来说, 其问题可以转化为核心冲突区路权的分配求解, 如无信号交叉路口、匝道合流区, 如图3所示. 路权(或道路通行权, right of way)为对特定时空范围道路资源的优先占有权和使用权. 通过此, 只需确定通过核心冲突区的顺序, 再反推所需要的轨迹, 就可将整个问题大大简化, 迎刃而解<sup>[60]</sup>.

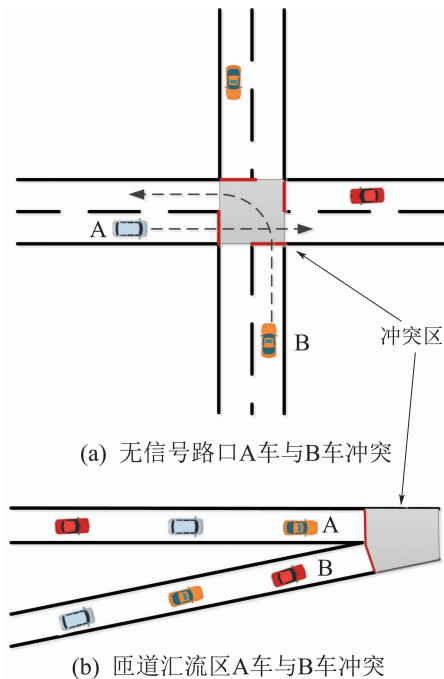


图3 典型的冲突地区驾驶场景

Fig. 3 Typical conflict driving scenarios

集群机器人中常用的FIFO策略是最简单的冲突区路权分配策略, 但是其找到的解常常不是最优解, 无法有效提高交通效率. 通过将所有路权分配策略进行遍历查询虽可以找到最优解, 但其遍历查询时间过长, 无法满足协同驾驶的实时性要求. 因此亟需针对协同驾驶特性找到适合其特点的协同规划策略<sup>[44,61]</sup>.

研究学者针对冲突区, 将碰撞约束表达形式进行修改, 将协同规划问题写为如下的优化问题:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{k=0}^K J(x_i(k), u_i(k)), \quad (9)$$

满足

$$\text{式(2)-(7)}, \quad (10)$$

$$t_i(z) - t_j(z) \geq \Delta t, \quad \forall i, j, \quad (11)$$

$$t_j(z) - t_i(z) \geq \Delta t, \quad \forall i, j, \quad (12)$$

其中:  $t_i(z)$  为第  $i$  辆车到达第  $z$  个冲突区的时间,  $\Delta t$  为两车满足不发生碰撞的安全间隔时间.

进一步, 通过引入混合整数变量, 将上述的“或”约束转为含有混合整数变量的不等式约束<sup>[61]</sup>:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{k=0}^K J(x_i(k), u_i(k)), \quad (13)$$

满足

$$\text{式(2)-(7)}, \quad (14)$$

$$t_i(z) - t_j(z) + M \cdot b_{ij} \geq \Delta t, \quad \forall i, j, \quad (15)$$

$$t_j(z) - t_i(z) + M \cdot (1 - b_{ij}) \geq \Delta t, \quad \forall i, j, \quad (16)$$

其中:  $M$  是一足够大的数,  $b_{ij}$  为0或1.

然而, 每增加一辆车时, 混合整数变量就要成倍增加, 使上述混合整数规划问题的计算复杂度随着车辆数量呈指数级增长, 这使得当交通流量较大时, 此规划策略无法满足协同规划的实时性要求<sup>[44]</sup>.

上述问题的本质原因是由于解空间巨大无法实时搜索最优解导致的. 因此, 研究者针对解空间搜索提出了一系列方法对上述问题进行简化. 主要思路可分为以下两种. 一种是利用交通领域知识, 将解空间进行剪枝压缩, 在保证较好解存在的前提下, 减小搜索空间, 以在实时性与最优性进行折中<sup>[60,62]</sup>. 文献[43]提出分组(grouping)方法, 将车间时距小于给定门限的多辆车视为一组, 组内车辆通过路口的顺序不变, 只计算组和组之间的顺序, 从而大大减少变量数目和解空间的规模, 加速求解过程. 文献[63]将通行顺序的解空间建模为树, 并使用蒙特卡洛树搜索(monte marlo tree search, MCTS)和FIFO, grouping等启发式策略组合, 只搜索那些具有潜力的规划解, 而不搜索整个空间, 从而极大提高交通效率和计算效率. 另一种则是重新构建解空间, 缩小新的解空间规模. 文献



[44]采用动态规划框架,将指数型空间变为多项式空间,极大减小了计算时间.但是相较于第一种方法,此类方法受限于马尔科夫性,只适用于特定的场景和目标函数.

随着通信范围和计算能力的增强,协同规划所考虑的范围从上述的单冲突区域扩展到多冲突区域.相较于单冲突区域,多冲突区域所涉及的变量更多,其求解规模的上升给实时协同规划增添了许多挑战.研究者多通过将多冲突区分解为一个一个单冲突区进行求解.不同冲突区间由于车辆轨迹交叉,存在着强耦合性,如何消掉因果环,进行有效的解耦处理是研究者亟待解决的问题<sup>[35]</sup>.

目前关于协同规划的研究还局限在单冲突区或相邻几个冲突区的协同驾驶,大规模交通路网下的协同规划还研究较少,这一部分亟待研究者进行更深的探索.随着人工智能、5G、云计算的发展,未来的协同规划可规划路面上全部车辆的轨迹,提升交通效率与安全,实现绿色协同安全高效驾驶<sup>[64-65]</sup>.

## 5 发展现状与未来展望

### 5.1 各国协同驾驶发展现状对比

协同驾驶虽得到世界各国学者的广泛关注,但是在世界各国协同驾驶的发展并不均衡.在国外尤其欧美地区,协同驾驶技术的发展历程长远而又曲折.虽然20世纪90年代初国外就已提出协同驾驶这一概念,但是协同驾驶在国外并未得到大范围的应用<sup>[2]</sup>.而我国虽起步较晚,但协同驾驶的发展迅速.随着2014年“863”计划主题项目“智能车路协同关键技术研究”顺利验收通过,其技术、系统和产品很快得到应用,近年先后在北京、上海、重庆等国家智能网联汽车测试基地得到应用,同时已列入计划,将在杭绍甬超级高速公路等多个省部级重大工程中开始规模化的示范应用<sup>[66]</sup>.各国协同驾驶发展的不均衡与各国的国情、政策、文化等有很大关系.

协同驾驶的大范围应用需要路侧和5G基站等的基础设施部署覆盖率达到一定要求.这需要国家的支持与大力投入.相较国外,中国对新型基础设施建设(简称新基建)更加重视,《2020年国务院政府工作报告》提出,重点支持“两新一重”(新型基础设施,新型城镇化,交通、水利等重大工程)建设.中国对新基建的大力投入,如5G基站建设、智慧高速建设等,极大推动了我国协同驾驶的发展.相较国内,国外更注重自我隐私保护,由于担心协同驾驶会泄露自身数据,国外对协同驾驶的接受度并不高.因此,较之协同驾驶,他们的主要研究对象和实际应用对象多为自动驾驶.而中国自我隐私保护意识相对淡薄,对协同驾驶的接受度也更高.

此外,相较国外,在中国很多大城市中,道路供给

资源始终小于道路行驶需求,交通拥堵问题更加严重,亟需协同驾驶这一新型手段解决交通拥堵.相对于交通拥堵车辆诱导、交通拥堵收费以及交通信号灯控制等传统交通管控策略而言,协同驾驶将整体交通管控和局部车辆调度两个层面的问题联系起来,可有效缓解中国的交通拥堵问题,使交通更安全,出行更畅通,因此受到了国家和民众的大力支持.

### 5.2 现阶段我国协同驾驶发展的难点与建议

较国外,国内的道路上有很多不同的三轮车、电动车、电动滑板车等等.交通参与者的多样性和复杂性使协同感知的稳定工作面临了很大挑战.因此在中国,协同驾驶需要多样化和全面的数据来驱动背后的算法模型.此外相较国外,国内民众遵守交通法规等的意识相对淡薄,民众不遵守交通法规的行为对协同驾驶中预测的能力提出了更高的要求.在这一方面,国家还需进一步加强对民众交通法律法规的教育与宣传,增强民众遵守交通法规的意识.

目前感知和预测能力还无法保证协同驾驶在全场景下的行驶安全,城市道路场景下交通参与者的复杂性和多样性使目前的协同驾驶技术无法适用于城市、乡村道路下的协同驾驶.相较城市道路、乡村道路场景,矿山、码头和专用高速公路等简单场景交通参与者单一(无行人、电动车等),对协同驾驶感知和预测能力要求较低,现有协同技术已满足这些场景的感知和预测要求.另一方面,协同驾驶需要对场景中的基础设施进行改造,增加5G基站、智能路侧等设备,其改造成本较高.相较城市等道路场景,矿山、码头和专用高速公路,因其带来的工业、商业价值巨大,可以承担较高的改造成本,建议协同驾驶可先在矿山、码头和专用高速公路等简单场景中进行应用.

现阶段我国协同驾驶还未实现真正“互联”,各类企业级平台以及政府监管平台信息交互还未联通,无法真正有效的实现全路网的协同驾驶.目前关于协同驾驶的主要应用为小范围的示范应用,如无锡的车联网示范项目<sup>[66]</sup>.为实现大范围的协同驾驶,需由国家主导建设和运营协同驾驶基础数据和交互平台,通过建立标准的数据交互方式,实现车、路、云的实时信息共享,以提供协同驾驶规划与控制,提高交通安全与效率.

### 5.3 协同驾驶的发展展望

目前的协同驾驶尚只考虑独立路口或少数路口间的交通控制,大范围时空下的协同驾驶亟待探索.协同驾驶在大规模交通路网下的优势还未充分发挥.研究者正在探讨未来实现提前规划和控制路面上行驶的每一辆车从出发地到目的地的整条轨迹,在完全掌握车辆信息和道路环境信息的前提下,控制中心可以计算出每辆车具体到每一秒钟的最优行驶路线并让

每辆车准确执行<sup>[7]</sup>.

但在今后较长的一段时间中,有人驾驶车辆和无人驾驶车辆混行在道路上,如何处理混合集群智能是值得深入研究的课题.一方面要避免驾驶员或者无人车误解对方的意图而发生碰撞,另一方面混行交通也为道路管理带来了新的挑战,需要构建与之适应的交通协同驾驶策略<sup>[67]</sup>.

此外,目前的感知和定位能力均无法胜任真实道路的全部场景,如何处理不确定性,进行容错协同驾驶亟待人们解决.并且通信的实时性和可靠性决定了大规模协同驾驶的成败,如何提高通信的实时性和可靠性来保障协同驾驶路权计算的合理、最优以及路权分配的及时准确是人们所要关注的重点.同时交通参与者的隐私性也需要得到更仔细的考量,这方面也将是今后关注的热点.

## 6 结语

智能网联、人工智能、云计算的发展为深入研究协同驾驶提供了可行的技术支撑及研究手段,将促进交通的全程规划和全面控制.相对于交通拥堵车辆诱导、交通拥堵收费以及交通信号灯控制等传统交通管控策略而言,协同驾驶将整体交通管控和局部车辆调度两个层面的问题联系起来处理,可以有效缓解交通拥堵,并提供更安全、更节能、更环保、更舒适的出行方式和综合解决方案.通过此,人们出行更加便捷、舒适,使民众幸福感极大提高,可有力促进和谐社会的构建.

本文从集群智能的角度对协同驾驶进行反思综述.与集群机器人对比,协同驾驶具有许多特性和难点,这些特性和难点需要国内外学者的重点关注.本文对协同驾驶技术架构进行了梳理,介绍了其与集群机器人的不同和协同驾驶关键技术,重点介绍了协同规划技术,最后介绍了协同驾驶在各国的发展现状,并对协同驾驶未来发展进行了展望.

## 参考文献:

- [1] KIANFAR R, AUGUSTO B, EBADIGHAJARI A, et al. Design and experimental validation of a cooperative driving system in the grand cooperative driving challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 994 – 1007.
- [2] PLOEG J, SEMSAR-KAZEROONI E, MEDINA A I M, et al. Cooperative automated maneuvering at the 2016 grand cooperative driving challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(4): 1213 – 1226.
- [3] NGUYEN A, SENTOUH C, POPIEUL J. Driver-automation cooperative approach for shared steering control under multiple system constraints: design and experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(5): 3819 – 3830.
- [4] SENTOUH C, NGUYEN A, BENLOUCIF M A, et al. Driver-automation cooperation oriented approach for shared control of lane keeping assist systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(5): 1962 – 1978.
- [5] MARCANO M, DIAZ S, PEREZ J, et al. A review of shared control for automated vehicles: theory and applications. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2020, 50(6): 475 – 491.
- [6] CHEN Hong, GUO Yangyang, LIU Jun, et al. Design of human-vehicle torque collaborative steering controller based on driving state prediction. *Control and Decision*, 2019, 34(11): 2390 – 2396. (陈虹, 郭洋洋, 刘俊, 等. 基于驾驶状态预测的人机力矩协同转向控制器设计. *控制与决策*, 2019, 34(11): 2390 – 2396.)
- [7] LI Li, WANG Feiyue. Century review and future prospect of ground traffic Control. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(4): 577 – 583. (李力, 王飞跃. 地面交通控制的百年回顾和未来展望. *自动化学报*, 2018, 44(4): 577 – 583.)
- [8] DOLK V, OUDEN J D, STEEGHS S, et al. Cooperative automated driving for various traffic scenarios: experimental validation in the GCDC 2016. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(4): 1308 – 1321.
- [9] XU H, ZHANG Y, CASSANDRAS C G, et al. A bi-level cooperative driving strategy allowing lane changes. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102773>.
- [10] LOKE S W. Cooperative automated vehicles: a review of opportunities and challenges in socially intelligent vehicles beyond networking. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019, 4(4): 509 – 518.
- [11] LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles. *Automotive Safety and Energy*, 2017, 8(1): 1 – 14. (李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势. *汽车安全与节能学报*, 2017, 8(1): 1 – 14.)
- [12] LI L, WEN D, YAO D. A survey of traffic control with vehicular communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(1): 425 – 432.
- [13] WANG Weijia, ZHENG Yating, LIN Guozheng, et al. Swarm robotics: a review. *Robotics*, 2020, 42(2): 232 – 256. (王伟嘉, 郑雅婷, 林国政, 等. 集群机器人研究综述. *机器人*, 2020, 42(2): 232 – 256.)
- [14] CAMAZINE S, DENEUBOURG J, FRANKS N, et al. *Selforganization in biological systems*. Princeton: Princeton University Press, 2001.
- [15] BRUTSCHY A, GARATTONI L, BRAMBILLA M, et al. The tam: abstracting complex tasks in swarm robotics research. *Swarm Intelligence*, 2015, 9(1): 1 – 22.
- [16] BRAMBILLA M, FERRANTE E, BIRATTARI M, et al. Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intelligence*, 2013, 7(1): 1 – 41.
- [17] DU Yonghao, XING Lining, CAI Zhaoquan. Overview of intelligent scheduling technology for unmanned aerial vehicle cluster. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(2): 222 – 241. (杜永浩, 邢立宁, 蔡昭权. 无人飞行器集群智能调度技术综述. *自动化学报*, 2020, 46(2): 222 – 241.)
- [18] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1987, 21(4): 25 – 34.
- [19] VICSEK T, CZIROK A, BENJACOB E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical Review Letters*, 1995, 75(6): 1226 – 1229.
- [20] MICHAEL R, ALEJANDRO C, RADHIKA N. Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm. *Science*, 2014, 345(6198): 795 – 799.
- [21] XU J L, ZHANG C J, WANG C H, et al. Approach to inter-satellite time synchronization for micro-satellite cluster. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(4): 805 – 815.

- [22] LI Y, WANG H, WANG W, et al. Evaluation of the impacts of cooperative adaptive cruise control on reducing rear-end collision risks on freeways. *Accident Analysis and Prevention*, 2017, 98(1): 87 – 95.
- [23] HUANG S, SADEK A W, ZHAO Y. Assessing the mobility and environmental benefits of reservation-based intelligent intersections using an integrated simulator. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 1201 – 1214.
- [24] TSUGAWA S. Inter-vehicle communications and their applications to intelligent vehicles: an overview. *Intelligent Vehicle Symposium*. Versailles, France: IEEE, 2002: 564 – 569.
- [25] HEDRICK J K, TOMIZUKA M, VARAIYA P. Control issues in automated highway systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 14(6): 21 – 32.
- [26] GEHRING O, FRITZ H. Practical results of a longitudinal control concept for truck platooning with vehicle to vehicle communication. *Proceedings of Conference on Intelligent Transportation Systems*. Boston, USA: IEEE, 1997: 117 – 122.
- [27] KATO S, TSUGAWA S, TOKUDA K, et al. Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and inter-vehicle communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(3): 155 – 161.
- [28] HU X, LIU Y, WANG G. Optimal search for moving targets with sensing capabilities using multiple UAVs. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2017, 28(3): 526 – 535.
- [29] ZHANG S, ZHANG H, DI B, et al. Cellular UAV-to-X communications: design and optimization for multi-UAV networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(2): 1346 – 1359.
- [30] DING L, WANG Y, WU P, et al. Kinematic information aided user-centric 5G vehicular networks in support of cooperative perception for automated driving. *IEEE Access*, 2019, 7: 40195 – 40209.
- [31] Hetzer D, Muehleisen M, Kousaridas A, et al. 5G connected and automated driving: use cases and technologies in cross-border environments. *European Conference on Networks and Communications*. Valencia, Spain: IEEE, 2019: 78 – 82.
- [32] LE D, PLAKU E. Multi-robot motion planning with dynamics via coordinated sampling-based expansion guided by multi-agent search. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 1868 – 1875.
- [33] JACKSON B E, HOWELL T A, SCHWAGER M, et al. Scalable cooperative transport of cable-suspended loads with UAVs using distributed trajectory optimization. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 3368 – 3374.
- [34] MA X, JIAO Z, WANG Z, et al. 3-D decentralized prioritized motion planning and coordination for high-density operations of micro aerial vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(3): 939 – 953.
- [35] LI L, WANG F. Cooperative driving at adjacent blind intersections. *Proceedings of IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Hawaii, USA: IEEE, 2005: 847 – 852.
- [36] LI L, WANG F, KIM H. Cooperative driving and lane changing at blind crossings. *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2005: 435 – 440.
- [37] LI L, WANG F. Cooperative driving at blind crossings using inter-vehicle communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(6): 1712 – 1724.
- [38] KLAUSEN K, MEISSEN C, FOSSEN T I, et al. Cooperative control for multirotors transporting an unknown suspended load under environmental disturbances. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(2): 653 – 660.
- [39] DONG X, YU B, SHI Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: theories and applications. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(1): 340 – 348.
- [40] BERNARDO M D, SALVI A, SANTINI S. Distributed consensus strategy for platooning of vehicles in the presence of time-varying heterogeneous communication delays. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(1): 102 – 112.
- [41] FENG S, SUN H, ZHANG Y, et al. Tube-based discrete controller design for vehicle platoons subject to disturbances and saturation constraints. *IEEE Transactions on Control Systems Technologies*, 2020, 28(3): 1066 – 1073.
- [42] FENG S, ZHANG Y, LI S, et al. String stability for vehicular platoon control: definitions and analysis methods. *Annual Reviews in Control*, 2019, 47(1): 81 – 97.
- [43] XU H, FENG S, ZHANG Y, et al. A grouping based cooperative driving strategy for CAVs merging problems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 6125 – 6136.
- [44] PEI H, FENG S, ZHANG Y, et al. A cooperative driving strategy for merging at on-ramps based on dynamic programming. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(12): 11646 – 11656.
- [45] LI Keqiang, LI Jiawen, CHANG Xueyang, et al. Principles and typical applications of cloud control system for intelligent and connected vehicles. *Automotive Safety and Energy*, 2020, 11(3): 261 – 275. (李克强, 李家文, 常雪阳, 等. 智能网联汽车云控系统原理及其典型应用. *汽车安全与节能学报*, 2020, 11(3): 261 – 275.)
- [46] KIM J H, KWON J, SEO J. Multi-UAV-based stereo vision system without GPS for ground obstacle mapping to assist path planning of UGV. *Electronics Letters*, 2014, 50(20): 1431 – 1432.
- [47] MARTI E, DE MIGUEL M A, GARCIA F, et al. A review of sensor technologies for perception in automated driving. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2019, 11(4): 94 – 108.
- [48] HEINZLER R, PIEWAK F, SCHINDLER P. CNN-based lidar point cloud de-noising in adverse weather. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 2514 – 2521.
- [49] PEREA-STROM D, MORELL A, TOLEDO J, et al. GNSS integration in the localization system of an autonomous vehicle based on particle weighting. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(6): 3314 – 3323.
- [50] XIE S, YANG D, JIANG K, et al. Pixels and 3-D points alignment method for the fusion of camera and LiDAR data. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(10): 3661 – 3676.
- [51] RAMANAGOPAL M S, ANDERSON C, VASUDEVAN R, et al. Failing to learn: autonomously identifying perception failures for self-driving cars. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(4): 3860 – 3867.
- [52] YUAN T, KRISHNAN K, CHEN Q, et al. Object matching for inter-vehicle communication systems—an IMM-based track association approach with sequential multiple hypothesis test. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(12): 3501 – 3512.
- [53] WANG Z, WU Y, MIU Q. Multi-sensor fusion in automated driving: a survey. *IEEE Access*, 2020, 8: 2847 – 2868.
- [54] XING Y, LV C, CAO D. Personalized vehicle trajectory prediction based on joint time-series modeling for connected vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(2): 1341 – 1352.
- [55] LI L, WANG S, TAN J. Comparison of travel mode choice between taxi and subway regarding traveling convenience. *Tsinghua Science and Technology*, 2018, 23(2): 135 – 144.
- [56] MA C, XUE J, LIU Y, et al. Data-driven state-increment statistical model and its application in autonomous driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(12): 3872 – 3882.
- [57] LIU A, LIAN L, LAU V, et al. Cloud-assisted cooperative localization for vehicle platoons: a turbo approach. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68(1): 605 – 620.
- [58] HUANG J, QIAN Y, HU R. Secure and efficient privacy-preserving authentication scheme for 5G software defined vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(8): 8542 – 8554.

- [59] LI L, LI X. Parsimonious trajectory design of connected automated traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 119(1): 1 – 21.
- [60] MENG Y, LI L, WANG F Y, et al. Analysis of cooperative driving strategies for nonsignalized intersections. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 2900 – 2911.
- [61] MULLER E R, CARLSON R C, JUNIOR W K. Intersection control for automated vehicles with milp. *IFAC Papersonline*, 2016, 49(3): 37 – 42.
- [62] DING J, LI L, PENG H, et al. A rule-based cooperative merging strategy for connected and automated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(8): 3436 – 3446.
- [63] XU H, ZHANG Y, LI L, et al. Cooperative driving at unsignalized intersections using tree search. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 21(11): 4563 – 4571.
- [64] GUO Y, XU H, ZHANG Y, et al. Integrated variable speed limits and lane-changing control for freeway lane-drop bottlenecks. *IEEE Access*, 2020, 8: 54710 – 54721.
- [65] GUO Q, LI L, BAN X. Urban traffic signal control with connected and automated vehicles: A survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 101(1): 313 – 334.
- [66] CHEN Chao, LÜ Zhiyong, FU Shanshan, et al. Overview of the development in cooperative vehicle-infrastructure system home and abroad. *Journal of Transport Information and Safety*, 2011, 29(1): 102 – 105.  
(陈超, 吕植勇, 付姗姗, 等. 国内外车路协同系统发展现状综述. *交通信息与安全*, 2011, 29(1): 102 – 105.)
- [67] DING J, PENG H, ZHANG Y, et al. Penetration effect of connected and automated vehicles on cooperative on-ramp merging. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, 14(1): 56 – 64.

### 作者简介:

**郭宇晴** 博士研究生, 目前研究方向为智能交通系统和智能汽车、协同驾驶, E-mail: gyq18@mails.tsinghua.edu.cn;

**姚丹亚** 研究员, 目前研究方向为基于车路协同的车辆协同安全驾驶、交通主动控制理论和技术等, E-mail: yaody@tsinghua.edu.cn;

**张毅** 教授, 目前研究方向为智能交通协同决策与智能控制、智能与自动驾驶技术、智能网联环境下状态协同感知与融合等, E-mail: zhyi@tsinghua.edu.cn;

**裴欣** 副研究员, 目前研究方向为道路交通安全评价、驾驶行为及驾驶风险研究、泛在网联环境下协同安全决策与控制方法, E-mail: peixin@tsinghua.edu.cn;

**李力** 副教授, 目前研究方向为人工智能、智能控制和感知、智能交通系统和智能汽车、复杂系统和网络化系统, E-mail: li-li@tsinghua.edu.cn;

**李志恒** 副教授, 目前研究方向为智能交通系统、交通信号控制系统、交通管理规划、智能公共交通系统、智能交通大数据, E-mail: zhli@tsinghua.edu.cn.